

PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN CARBON FIBER REINFORCED PLATE

Endah Kanti Pangestuti

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Gedung E4, Kampus Sekaran Gunungpati Semarang 50229

Nuroji

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro (UNDIP)
Gedung D.Lt1, Tembalang Semarang 50239

Antonius

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA)
Jl.Kaligawe Km 4 Semarang 50112

Abstract: The flexural strengthening of reinforced concrete beam can be considered with applied externally bonded steel plate or carbon fiber composite. These external plate is bonded to the tension face of the concrete beam. Two beams were provided in this study to test the flexural strengthening effect of externally bonded CFRP composite. One of them was used for normal condition and the other was applied with CFRP. The result shows that beam with externally CFRP at to the tension face could increase the ultimate flexural strength 41.4 %, increase the ultimate load 49%, strain reduction in the steel reinforced bar 26%, and it also reduced deflection in beam 77.6%. Debonding failure mechanism between surface of CFRP and concrete dominantly occurred.

Keywords: CFRP, flexural strengthening, debonding failure

Abstrak: Peningkatan kuat lentur pada balok beton bertulang dapat dilakukan dengan menempatkan pelat baja atau bahan komposit non logam secara *external*. Pelat tersebut dilekatkan pada permukaan tarik balok. Penelitian dilakukan pada dua buah balok untuk menguji pengaruh kuat lentur dari bahan komposit CFRP pada balok beton bertulang. Satu buah balok sebagai balok normal tanpa CFRP sedangkan yang satunya dipasang CFRP. Hasil pengujian lentur menunjukkan bahwa model balok beton bertulang dengan CFRP dapat meningkatkan kuat lentur sebesar 41,4%, meningkatkan beban ultimit sebesar 49%, selain itu dapat mengurangi regangan pada tulangan tarik sebesar 26%, dan juga mengurangi defleksi pada balok sebesar 77,6%. Model keruntuhan yang terjadi pada balok dengan CFRP adalah *debonding Failure*.

Kata kunci: CFRP, kuat lentur, *debonding failure*

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material yang banyak digunakan pada struktur bangunan sipil karena mempunyai beberapa kelebihan antara lain: mempunyai kuat tekan besar, tahan air dan cuaca, mudah dibentuk, serta bahan dasarnya mudah diperoleh. Tetapi, beton mempunyai perilaku yang spesifik yaitu mempunyai kuat tarik lebih kecil dari kuat tekannya. Karena itu, material beton umumnya digabungkan dengan material lain yang mempunyai kekuatan tarik besar, seperti baja tulangan atau baja profil dalam kesatuan struktur komposit.

Besarnya kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja di dalam beton (jarak *jd*). Semakin besar jarak *jd* maka kapasitas momen yang terjadi akan semakin besar pula, sehingga nilai *jd* diupayakan maksimum dengan meletakkan tulangan di luar beton. Namun, hal tersebut menjadikan tidak tersedianya lekatan cukup antara tulangan baja dan beton, sehingga aksi komposit yang diharapkan tidak dapat terjadi. Lebih lagi baja tulangan merupakan material yang rentan terhadap korosi apabila tanpa perlindungan.

Di lain pihak ada *carbon fiber reinforced plate* (CFRP) yang menawarkan beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh baja tulangan yaitu: mempunyai kuat tarik lebih tinggi dari baja tulangan yaitu 2800 MPa, mempunyai kekakuan yang cukup tinggi dengan modulus elastisitasnya (E) 165.000 MPa, tidak mengalami korosi karena terbuat dari bahan non logam, mempunyai penampang yang kecil dan ringan, serta mudah pemasangannya.

Penelitian yang dilakukan ini merupakan kajian eksperimental dengan penambahan CFRP pada balok beton bertulang sebagai tulangan eksternal. Penempatannya di bagian luar balok tanpa perlindungan tidak akan menyebabkan korosi karena terbuat dari bahan non-logam, selain itu jarak jd dapat dioptimalkan sehingga dapat menghasilkan kapasitas lentur yang maksimal pula.

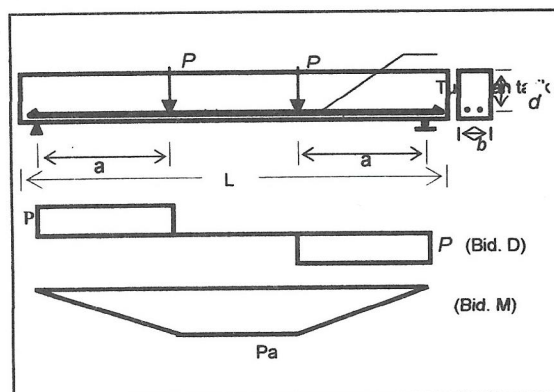
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui manfaat penggunaan CFRP sebagai tulangan eksternal pada balok beton bertulang, sehingga dapat diketahui sejauh mana pengaruhnya terhadap kapasitas momen lentur yang dihasilkan.

LANDASAN TEORI

Balok Lentur

Balok adalah batang struktural yang dirancang untuk menahan beban-beban yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap sumbunya. Beban tersebut akan menyebabkan balok melentur sehingga akan terbentuk sejumlah gaya-gaya dalam akibat mekanisme tegangan–tegangan yang timbul di dalam balok.

Struktur balok beton bertulang dengan tumpuan sederhana (*simple beam*) yang dibebani secara simetris dengan dua buah gaya P sejauh a dari tumpuan, maka akan terjadi



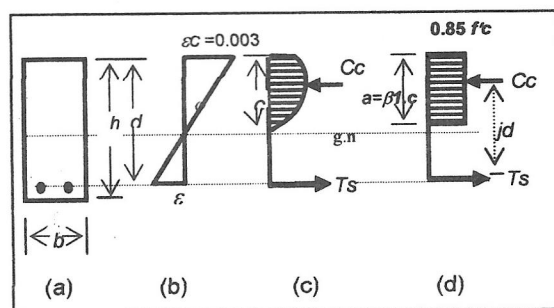
Gambar 1. Bentuk Pembebanan Balok dalam Keadaan Lentur Murni

keadaan lentur murni yaitu momen konstan sebesar $P.a$ di daerah antara kedua beban P (Gambar 1).

Untuk mendapatkan uji lentur struktur balok dapat dilakukan dengan membuat perbandingan antara bentang geser dan tinggi efektif balok $(a/d) \geq 3$ (Gambar 1), serta mendesain agar keruntuhan yang akan terjadi adalah keruntuhan tarik (*tension failure*).

Kuat Lentur Balok Tampang Persegi

Kondisi tegangan–regangan penampang beton yang mengalami lentur dapat dilihat pada Gambar 2, di mana (a) Balok, (b) Regangan, (c) Tegangan aktual, dan (d) Tegangan persegi. Dalam hal ini, C_c = gaya tekan beton, T_s = gaya tarik tulangan baja, dan jd = jarak dari C_c sampai T_s .



Gambar 2. Distribusi Tegangan–Regangan Beton

Berdasarkan Gambar 2, maka:

$$Cc = 0.85 f'c \cdot a \cdot b \quad (1)$$

$$Ts = As \cdot fy \quad (2)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam adalah:

$$Cc + Ts = 0 \quad (3)$$

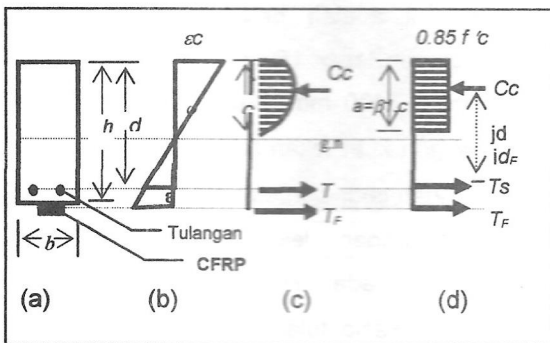
$$Cc = Ts \quad (4)$$

$$0.85 f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fy \quad (5)$$

$$a = \frac{As \cdot fy}{0.85 f'c \cdot b} \quad (6)$$

Berdasarkan gaya-gaya yang bekerja di atas, momen nominal penampang adalah:

$$Mn = As \cdot fy \cdot jd \quad (7)$$



Gambar 3. Distribusi Tegangan Regangan Beton Dengan CFRP

Apabila balok beton dipasang CFRP maka kuat lentur balok yang terjadi adalah seperti yang diusulkan oleh Kuriger dkk. (2001) seperti pada Gambar 3, dengan T_F = gaya tarik CFRP dan jd_F = jarak dari Cc sampai T_F .

Berdasarkan Gambar 3, maka:

$$T_F = As_F \cdot fy_F \quad (8)$$

Syarat kesetimbangan gaya-gaya dalam penampang balok dengan perkuatan CFRP:

$$Cc = Ts + T_F \quad (9)$$

$$0.85 f'c \cdot a \cdot b = As \cdot fy + As_F \cdot fy_F \quad (10)$$

$$a = \frac{0.85 f'c \cdot b}{As \cdot fy + As_F \cdot fy_F} \quad (11)$$

sehingga akan menghasilkan:

$$Mn = As \cdot fy \cdot jd + As_F \cdot fy_F \cdot jd_F \quad (12)$$

Berdasarkan kedua bentuk persamaan (7) dan (12), maka terlihat adanya penambahan pada kapasitas lenturnya sebesar $As_F \cdot fy_F \cdot jd_F$. Maka dapat dikatakan bahwa dengan penambahan CFRP kapasitas lenturnya meningkat.

REVIEW PENELITIAN TENTANG BALOK YANG DIPASANG CFRP

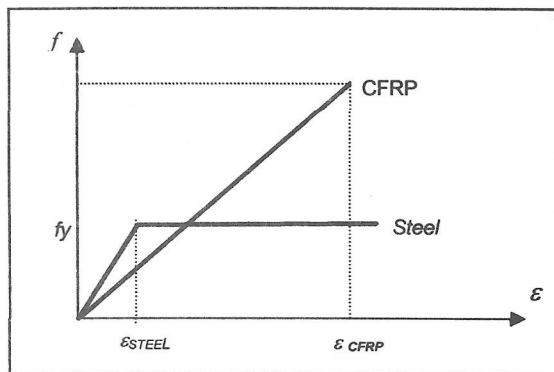
Kuriger dkk. (2001) menunjukkan bahwa pengujian lentur terhadap balok-balok yang diberi CFRP akan mengakibatkan pengurangan regangan 11,5% sampai 58,6% pada tulangan tarik, dan pengurangan regangan tekan beton 3% sampai 33,5% serta mengurangi defleksi pada balok 8% sampai 53,1%. Sedangkan tipe keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan geser pada beton, keruntuhan pada CFRP dan *debonding* pada CFRP yang mana didominasi oleh *debonding* CFRP.

Aprile dkk. (2001) menyatakan bahwa pelat CFRP yang dilekatkan pada bagian bawah balok diperhitungkan sebagai satu kesatuan struktur yang menerima beban bersama-sama. Aksi komposit tersebut hanya dapat terjadi karena adanya lekatan yang baik antara kedua bahan tersebut. Peran *bond* sangat penting dalam menyalurkan tegangan dari beton ke CFRP atau sebaliknya. Kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan pelat CFRP selalu diawali dengan *debonding* pada pelatnya.

Purwanto (2001) menunjukkan bahwa penambahan CFRP pada balok beton bertulang pascabakar dapat meningkatkan kekakuan sebesar 2,41%, daktilitas turun sebesar 18,01% dan kuat lentur ultimit naik sebesar 6,06% terhadap beton pasca bakar. terjadi pola keruntuhan *debonding failure*.

Ozel dkk. (2003) melakukan perbandingan terhadap balok yang ditulangi dengan tulangan baja dan *glass fiber reinforced plastic* (GFRP). Hasil pengujian lentur menunjukkan bahwa baja mempunyai modulus elastisitas (E) yang besar sedangkan tegangan leleh yang terjadi (f_y) jauh lebih kecil dari CFRP. Hal itu menjelaskan bahwa baja merupakan material yang lebih kaku dari pada CFRP, sedangkan kuat tariknya lebih rendah dari CFRP. Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan tegangan-regangan tulangan baja dengan CFRP.

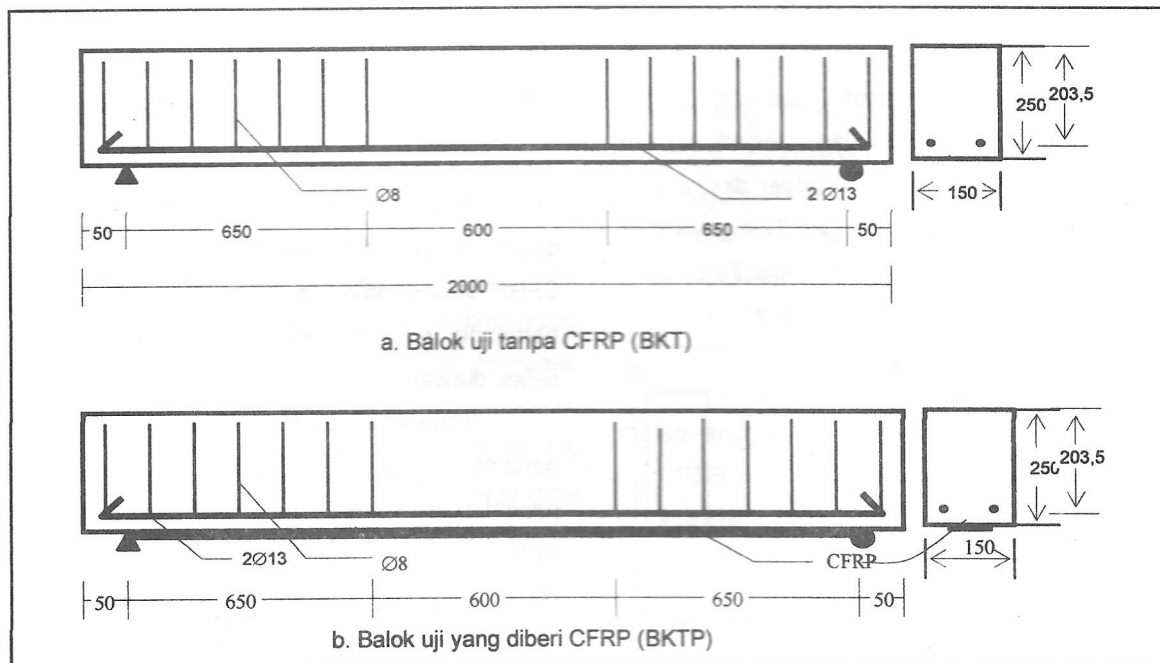
Menurut Kuriger dkk. (2001) pola keruntuhan pada struktur balok yang diberi CFRP dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu: keruntuhan geser, *debonding failure*, dan keruntuhan pada CFRP. Dari ketiga macam keruntuhan tersebut maka yang dikehendaki adalah keruntuhan pada CFRPnya terlebih dahulu (CFRP *rupture*), sehingga seluruh kekuatan CFRP dapat bekerja secara optimal.



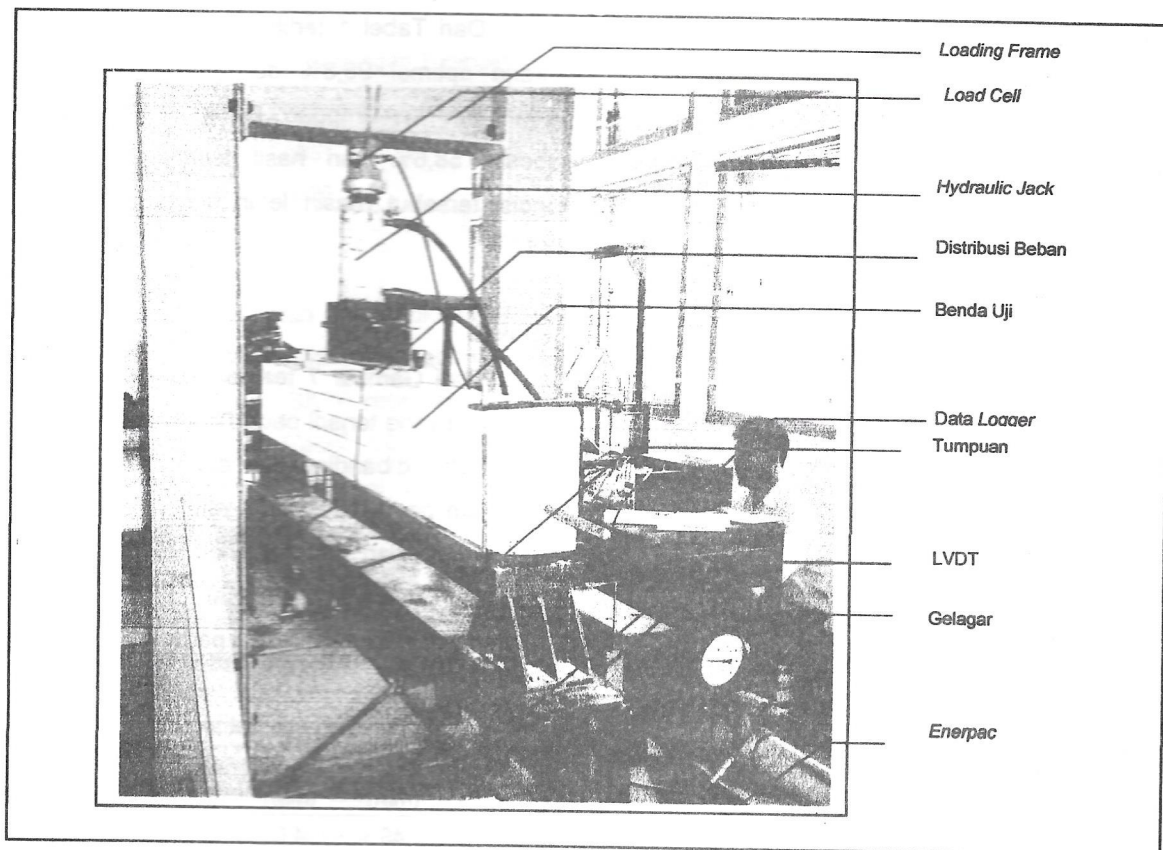
Gambar 4. Hubungan Tegangan – Regangan Baja dan CFRP

METODE PENELITIAN

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah balok beton bertulang dengan ukuran lebar 150 mm, tinggi 250 mm, dan bentang 2000 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan $f'_c = 32,97 \text{ MPa}$. Dua buah tulangan tarik diameter 13 mm ($2\phi 13$) dengan tegangan leleh $f_y = 336 \text{ MPa}$ ditempatkan pada kedalaman 203,5 mm (Gambar 5). Rasio tulangan (ρ) dibuat lebih



Gambar 5. Balok Uji dan Pemasangan CFRP



Gambar 6. Set Up Pengujian

kecil dari rasio penulangan maksimum ($\rho \leq 0,75 \rho_b$) dengan maksud supaya diperoleh fenomena *underreinforced*. Agar terjadi keruntuhan lentur, daerah geser balok diperkuat tulangan geser dengan menempatkan begel-begel berdiameter 8 mm dalam interval 110 mm.

Benda uji dalam penelitian ini ada dua buah seperti pada Gambar 5, yang terdiri dari:

- BKT adalah balok beton bertulang tanpa CFRP, yang berfungsi sebagai balok kontrol.
- BKTP adalah balok beton bertulang yang dipasang CFRP pada serat tarik terluar sepanjang balok.

Data hasil pengujian lentur kedua benda uji tersebut dibandingkan untuk mengetahui perubahan respon struktur balok akibat penambahan CFRP.

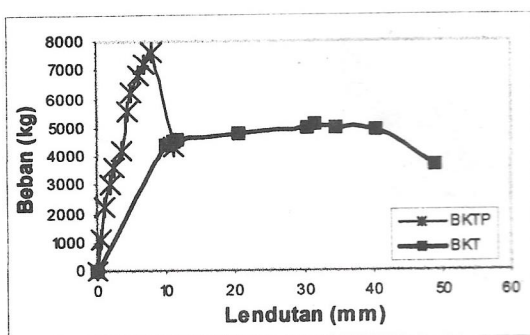
Set Up Pengujian

Set up pengujian seperti pada Gambar 6. Benda uji balok beton bertulang ditempatkan pada *loading frame* dan tumpuan dikondisikan sendi-roll pada kedua ujungnya. Pembebanan dilakukan di dua titik secara simetris dengan jarak 600 mm antar titik pembebanan dan sejauh 650 mm dari masing-masing tumpuan. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan dilakukan dengan bantuan *hidraulic jack* dan *load cell*. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang 3 buah *linear variable displacement transducers* (LVDT). Dua buah ditempatkan pada tumpuan dan 1 buah di tengah bentang balok. Untuk mengukur

regangan pada beton dipasang *strain gauge* pada sisi tekan terluar balok, sedangkan untuk mengukur regangan tarik dipasang *strain gauge* pada tulangan dan CFRP. Data pertambahan beban, defleksi dan regangan tercatat melalui *data logger*. Pembebanan dihentikan jika benda uji sudah runtuh dan *data logger* yang membaca besarnya beban dari *load cell* tidak bertambah.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pengujian lentur maka dapat diketahui respon balok-balok uji terhadap pembebanan.



Gambar 7. Hubungan P- δ pada Balok Uji

Beban Ultimit

Dari Gambar 7 terlihat bahwa balok BKT dapat mencapai beban ultimit sebesar 5,1 ton sedangkan BKTP mampu mencapai 7,6 ton. Jadi penambahan CFRP pada balok dapat meningkatkan beban ultimit sebesar 49 %. Besar beban ultimit yang dipikul oleh balok uji menurut hasil eksperimen dan perhitungan teoritis dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Beban Ultimit Balok

Kode Benda uji	P (ton)		
	Ekspr.	Teoritis	eksp/teo
BKT	5,1	5,32	0,958
BKTP	7,6	12,97	0,586

Dari Tabel 1 terlihat bahwa balok BKT bekerja optimal 95,8% dari hasil teoritisnya. Sedangkan kemampuan balok BKTP hanya sebesar 58,6% dari hasil teoritisnya, tetapi kondisi tersebut masih lebih tinggi dari balok BKT.

Defleksi

Dari Gambar 7 terlihat bahwa lendutan maksimum yang terjadi pada BKTP yaitu 11 mm lebih kecil dibandingkan dengan lendutan maksimum pada balok BKT yaitu 49 mm. Jadi dengan demikian penambahan CFRP dapat mereduksi lendutan sebesar 77%. Besar lendutan selengkapnya dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Besar Defleksi pada Beban Ultimit

Benda Uji	δ_{maks} (mm)	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Daktilitas (δ_u/δ_y)
BKT	49	4,0	40,5	10,125
BKTP	11	2,0	8	4,0

Keterangan: δ_y = lendutan saat leleh
 δ_u = lendutan saat beban ultimit

Dari Tabel 2 Daktilitas yang terjadi pada balok beton bertulang yang diberi CFRP turun sebesar 60,5% dibandingkan dengan balok tanpa CFRP

Kekakuan

Kekakuan lentur balok uji terlihat pada Tabel 3. Dari Tabel 3 terlihat bahwa kekakuan balok yang diberi CFRP naik sebesar 180 % dari balok tanpa CFRP.

Tabel 3. Nilai Kekakuan pada Benda Uji

Benda Uji	P_y (ton)	δ (mm)	Kekakuan (P_y/δ)
BKT	2,0	4,0	0,5
BKTP	2,8	2,0	1,4

Tabel 4. Perbandingan Nilai Regangan Tulangan Baja pada Balok Uji

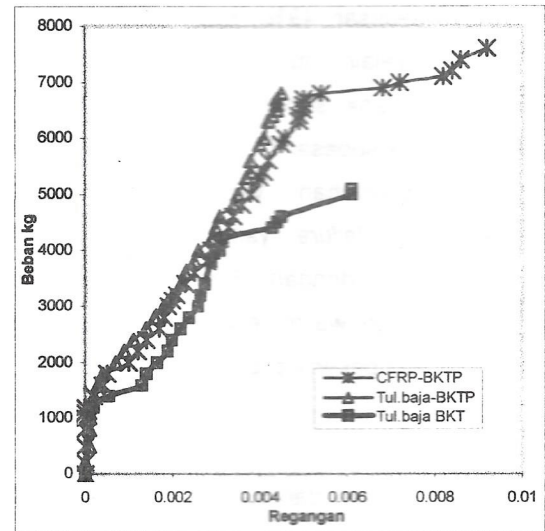
Balok	Reg. pada P=4 t	Pengurangan (%)	Reg. maks	P maks (ton)	Pengurangan (%)
BKT	0.0031	0	0.0061	5,1	0
BKTP	0.0026	16	0.0045	7,6	26

Retak Awal

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa balok BKT retak awal terjadi pada beban 1,2 ton sedangkan pada balok BKTP retak awal terjadi pada beban 1,6 ton. Retak awal ini ditandai dengan retak rambut sebagai indikasi telah terlampauinya regangan tarik beton. Dengan demikian pemasangan CFRP pada balok dapat menghambat terjadinya *first crack* yaitu dengan meningkatnya beban saat retak sebesar 33%.

Regangan

Respon regangan tulangan dan CFRP pada benda uji setelah dilakukan pembebanan seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan $P-\epsilon$ pada Tulangan Baja dan CFRP

Dari Gambar 8. terlihat bahwa pada beban 4 ton regangan tulangan baja pada balok BKTP turun sebesar 16% dari balok BKT, hal itu

menunjukkan bahwa sebagian gaya tarik yang bekerja pada tulangan telah diserap oleh tulangan CFRP. Kemudian saat beban mencapai maksimum regangan tulangan tarik BKT sebesar 0,0061 sedangkan pada BKTP sebesar 0,0045. Jadi dengan pemasangan CFRP dapat menghambat laju pertambahan regangan tulangan tarik sebesar 26%. Disamping itu CFRP dapat juga menghambat terjadinya leleh pada tulangan tarik, dimana pada balok BKT leleh terjadi pada beban 2 ton sedangkan pada BKTP terjadi pada 2,8 ton. Regangan pada tulangan baja selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.

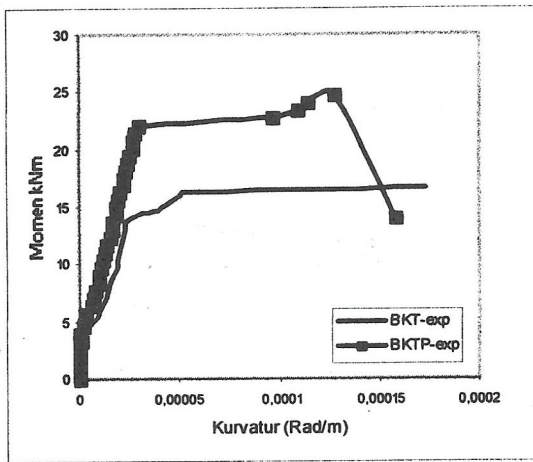
Kuat Lentur

Dari hasil pengujian, diketahui besarnya beban maksimum yang mampu ditahan oleh balok beton, kemudian beban tersebut digunakan untuk menghitung kuat lentur ultimit yang terjadi. Nilai kuat lentur ultimit eksperimen dan teoritis selengkapnya dimuat pada Tabel 5.

Tabel 5. Kuat lentur teoritis dan eksperimen

Kode Benda uji	M (kNm)		
	Ekspr.	Teoritis	Eksp/teo
BKT	16,575	17,287	0,958
BKTP	24,7	42,15	0,586

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa dari hasil eksperimen ada peningkatan kuat lentur sebesar 49% setelah balok diberi CFRP. Pada balok BKT, selisih kuat lentur hasil eksperimen



Gambar 9. Momen – Kurvatur Balok Uji

terhadap hasil perhitungan hanya 4,2%. Hasil eksperimen BKTP mempunyai selisih sebesar 41,4% dari hasil teoritis. Pada saat beban pada balok BKTP mencapai ultimit, regangan CFRP yang terjadi sebesar 0,0092, dengan demikian maka kuat lentur yang bekerja sebesar 1518 MPa atau hanya 54% dari yang kuat lentur yang bisa dicapai yaitu 2800 MPa. Hal itu terjadi karena terjadinya *debonding* pada CFRP terlebih dahulu sebelum CFRP bekerja secara optimal meningkatkan kapasitas momennya.

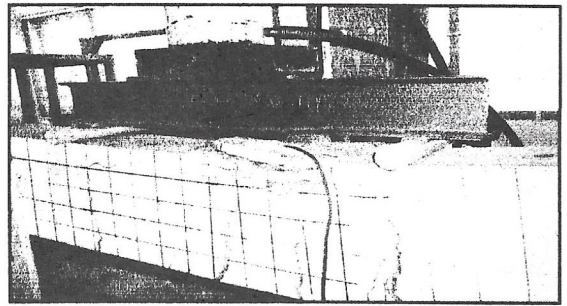
Pola Keruntuhan

Pengamatan pola keruntuhan terhadap balok uji selama pengujian dimuat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Dari Gambar 11, pola keruntuhan balok yang diberi CFRP adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara pada permukaan pelat CFRP dengan beton.

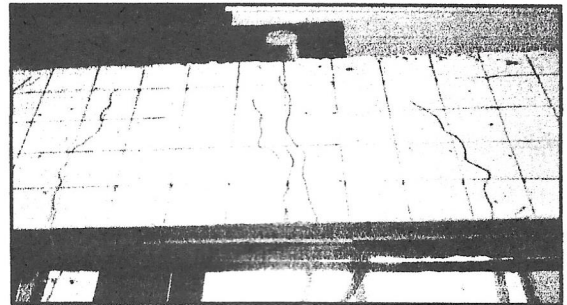
PENUTUP

Kesimpulan

1. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok dapat menghambat munculnya *first crack*, dimana beban saat retak awal meningkat sebesar 33%.



Gambar 10. Pola Keruntuhan BKT



Gambar 11. Pola Keruntuhan BKTP

2. Penambahan pelat CFRP secara eksternal pada balok dapat meningkatkan beban ultimit sebesar 49%, kuat lentur sebesar 41,4%, selain itu mengurangi regangan tulangan tarik sebesar 26% dan defleksi pada balok sebesar 77,6%.
3. Pola keruntuhan yang terjadi adalah *debonding failure* yaitu lepasnya ikatan antara beton dengan CFRP, sehingga dapat dikatakan bahwa material komposit tersebut belum bisa bekerja secara optimal.

Saran

Mengingat dari hasil penelitian ini dan beberapa penelitian lain yang mempergunakan CFRP terdapat kesamaan pada pola keruntuhan yaitu terjadinya *debonding failure* yang mengawali keruntuhan pada balok, maka perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi keadaan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Purwanto, E.. 2001. *Perkuatan Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Pascabakar dengan Carbon Fiber Strips dan Carbon Wrapping*. Tesis tidak dipublikasikan. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Kuriger, R., Sargand, S.; Ball, R. dan Alam, K. 2001. *Analysis of Composite Reinforced Concrete Beams*. Dept. of Mechanical Engineering, Ohio University.
- Lorenzis, Laura dan Nanni, Antonio. 2001. "Characterization of FRP Rods as Near Surface Mounted Reinforcement", *Journal of Composite for Construction*, May 2001, hal. 114–121.
- Aprile, A., Spacone, E., Limkatanyu, Suchart. 2001. "Role of Bond in RC Beams Strengthened with Steel and FRP Plates", *Journal of Structural Eng.*, December 2001, hal. 1445 –1452.
- Harmon, T., Kim, Y., John, Kardos, Johnson, T.; Stark, A.. 2003. "Bond of Surface-Mounted Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures", *ACI Structural Journal*, V.100, No. 5, September–October 2003, ha. 557–564.
- Park and Paulay. 1974. *Reinforced Concrete Structures*. Department of Civil, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Ozel, B., Arora, dan Gonenc. 2003. *Comparison Between FRP Rebar, FRP Grid, and Steel Rebar Reinforced Concrete Beams*. Dept. of Civil Eng., University of Wisconsin-Madison, USA.